

Vortex áramlásmérők rendhagyó nemlinearitás-vizsgálata

Fenyvesi Bence*

Abstract

Vortex shedding flowmeters can be used for a wide range of flow measurement applications with various kinds of fluids. The critical point in applying this measurement method comes from the assumption that the Strouhal number is constant for the given Reynolds number range. In some cases, this assumption is only partially met, thus limiting the widespread use of these instruments in certain industrial appliances. The paper presents a novel approach for the diagnostic investigation on the effects of this nonlinear behavior via examining two flowmeters with different sizes, gauge-pipe cross-sections and working fluids. The method elaborated in this report can be applied to instruments, where measurement possibilities are limited, thus it is not possible for the user to determine the effects of the nonlinear behavior. To conduct these investigations, separate calibration rigs were designed and assembled for both flowmeters. The results of the investigations can be used in future R+D efforts aiming to reduce the uncertainty of the volume flow rate measured by vortex flowmeters.

Absztrakt

Az örvényhagyó elven működő vortex áramlásmérők széles körben alkalmazhatók cseppfolyós, illetve gáz/gőz közegek térfogatáram méréséhez. A mérési módszer kritikus pontja a *Strouhal*-szám értékének állandósága a vizsgált *Reynolds*-szám tartományon. Mivel bizonyos esetekben ez a feltétel csak részben teljesül, e műszerek használata egyes ipari alkalmazásokban még korlátozott. Jelen tanulmány célja a vortex áramlásmérők nemlinearitás-vizsgálatára kidolgozott rendhagyó módszer bemutatása, két, jelentősen különböző méretű és kialakítású, valamint egymástól eltérő munkaközeggel használható áramlásmérő esettanulmányán keresztül. A kifejlesztett módszer olyan limitált műszerezéssel rendelkező vortex-térfogatárammérők esetén is alkalmazható, amelyeknél hagyományos módszerekkel a nemlinearitás hatása nem meghatározható. Ezen vizsgálatok elvégzéséhez az esettanulmányul választott mérőműszerek kalibrálására alkalmas berendezéseket terveztem, melyeket a tervek alapján megépítettem. A bemutatott vizsgálatok eredményei felhasználhatók a vortex áramlásmérők térfogatárammérési hibájának csökkentésére irányuló jövőbeni kutatás-fejlesztési törekvések során.

* A Körös Campus Alapítvány minden évben pályázatot ír ki a mérnök hallgatók számára. A beadott pályamunkákat az alapítvány kuratóriuma értékeli, illetve dönt a támogatás/ösztöndíj odaítéléséről és mértékéről. A nyertes pályamunkák közül Olvasóink a következőkben Fenyvesi Bence munkájával ismerkedhetnek meg.



1. Bevezetés

A mérőműszerekkel szemben támasztott egyik legfontosabb követelmény a mérési pontosság, illetve a megbízhatóság. Bár 2007-ben az Amerikai Ásványolaj Intézet (API) közegértékesítési alkalmazásokban való használatra is alkalmasnak minősítette a vortex áramlásmérőket [1], egyes altípusok alapos vizsgálata és továbbfejlesztése több szempontból is jelentősen indokolt.

Az eszköz áramlástechnikai elve kimondja, hogy egy áramlásba helyezett tompa test felületéről egy bizonyos *Reynolds*-szám (*Re*) tartományban *Kármán*-féle örvénysor úszik le. Ebben a tartományban a *Strouhal*-szám (*Str*) állandóságát feltételezve az örvények leválási frekvenciája arányos a közeg sebességével, ezáltal pedig a térfogatárammal [2]. A módszer nagy előnye, hogy a *Strouhal*-szám nem függ viszkozitástól (*v*), így akár többfázisú közegek térfogatáramának meghatározására is alkalmazható.

Az örvényleválási jelenség jellemzéséhez szükséges *Strouhal*-, illetve a *Reynolds*-számok alakja a következő:

$$\text{Str} = \frac{f \cdot d}{u}, \quad (1)$$

$$\text{Re} = \frac{u \cdot d}{\nu}. \quad (2)$$

A *Strouhal*-számot, az örvényhagyó elem áramlásra merőleges keresztmetszetének szélességét (*d*), valamint az örvényleválási frekvenciát (*f*) ismerve kiszámítható az áramlási sebesség (*u*). Ideális esetben, a *Strouhal*-szám *Reynolds*-szám függetlensége esetén, teljes mértékben lineáris karakterisztikájú áramlásmérő műszer lenne kialakítható, amely az örvényleválási frekvenciájával egyenesen arányos térfogatáram adatot szolgáltat a teljes mérési tartományon.

Az elmúlt években ipari felhasználásra szánt vortex áramlásmérők kalibrálásával foglalkoztam, és tapasztalataim azt mutatták, hogy bár a műszer alapelve szerint a felvett kalibrációs görbéknek teljes mértékben lineárisnak kellett volna lenniük, a mérési pontok a kalibrációs diagramon egy bizonyos trendet követve eltérnek ettől. Megállapítottam, hogy ez a viselkedés több, jelentősen eltérő térfogatáramon, valamint üzemi hőmérsékleten is hasonló módon jelentkezik, ezért a jelenség átfogó vizsgálata kétségkívül szükséges.

Mivel egyes vortex áramlásmérők esetén, főként az eszköz mérete miatt, az elhelyezhető érzékelők és kijelzési módok mennyisége limitált, sok esetben az örvényleválási frekvencia kijelzése nem megoldott. Az örvényleválási frekvencia ismerete nélkül nem számítható a műszer adott állapotához tartozó *Strouhal*-szám, így annak *Reynolds*-szám függvényében való lefutása sem vizsgálható. Céлом, hogy két ipari vortex áramlásmérő kalibrációs esettanulmányán keresztül olyan rendhagyó vizsgálati módszert mutassak be, amely a műszerek nemlineáris viselkedésének kritikai elemzésére

használható. Ennek az új módszernek az alkalmazásával az említett limitált mérési lehetőségek mellett is jó közelítéssel feltárható a *Strouhal*-szám *Reynolds*-szám függése az adott eszközre vonatkozóan.

Az esettanulmányul választott vortex áramlásmérő műszerek egyikével folyadék-, míg a másikkal levegő munkaközeg térfogatárama mérhető. Mivel *Reynolds*-szám tartományaik is különböző nagyságrendbe esnek, így átfogó kép kapható a nemlinearitási jelenségről. Az első eszköz („A” műszer) a fent bemutatott, limitált mérési lehetőségekkel rendelkező csoportba tartozik, míg a második műszer („B”) esetén van lehetőség az örvényleválási frekvencia közvetlen mérésére. A tanulmány során bemutatom mindkét áramlásmérő *Strouhal*-szám – *Reynolds*-szám diagramjának meghatározását a kidolgozott vizsgálati módszer segítségével, majd a „B” műszerhez tartozó valós mérési pontokból előállított diagram segítségével elvégzem a módszer ellenőrzését.

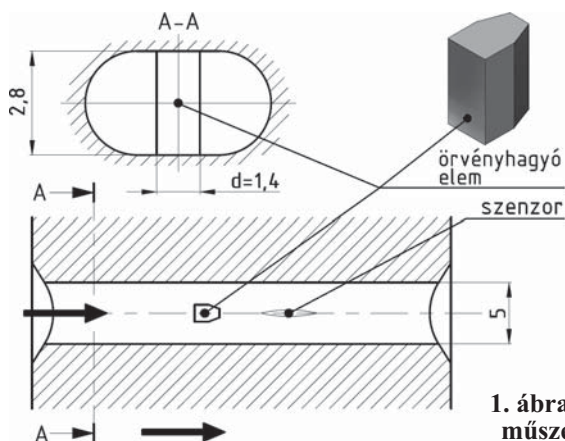
2. Az áramlásmérők belső felépítése

A folyadékkal végzett vizsgálatokhoz használt „A” jelű mérőműszer mérőcsatornájának hossztengetyre merőleges metszete, valamint keresztmetszete az 1. ábra bal oldalán látható. Az örvényhagyó elem speciális alakú, melyet a szakirodalom delta-típusú elemnek nevez. Mivel a meglehetősen kis méretek ($d = 1,4$ mm) miatt a fali határreteg vastagsága közel egy nagyságrendbe esik a mérőcsatorna szélességével, e két méret arányának növelése érdekében a csatorna keresztmetszete „lóversenypálya” alakú, ami eltér a vortex áramlásmérőkben hagyományosan alkalmazott kör keresztmetszettől.

A levegő munkaközeggel végzett vizsgálatok során használt „B” mérőműszer mérőcsatornájának felépítése az 1. ábra jobb oldalán látható. A mérési elvből eredő hasonlóságok mellett megfigyelhető, hogy az eszköz méretei jellemzően egy nagyságrenddel meghaladják az „A” műszerhez tartozó geometriai adatokat, valamint a mérőcsatorna keresztmetszete kör alakú. Ellentétben az „A” műszerrel, a „B” jelű áramlásmérőhöz csatlakoztatott jelfeldolgozó egység több mennyiség, így az örvényleválási frekvencia közvetlen mérését és leolvasását is lehetővé teszi.

3. Kalibráció

Bármely kalibráló berendezés tervezéséhez elengedhetetlen a kalibrálandó műszer mérési pontosságának ismerete.



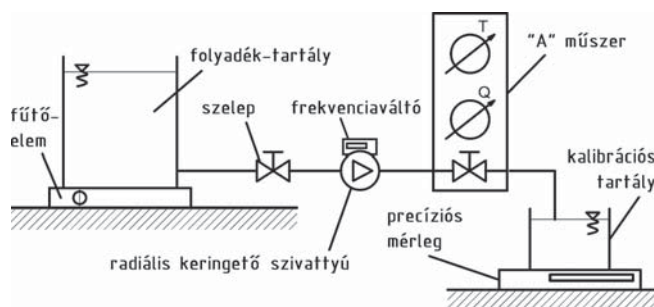
1. ábra. Az „A” (balra) és „B” (jobbra) műszerek mérőcsatornáinak felépítése

Jelen esetben az „A” műszer pontossága $\pm 3\%$, míg a „B” műszeré $\pm 1\%$, a teljes mérési tartományra vonatkoztatva [3, 4]. Ez a mérési tartomány az „A” műszer esetében $0,5 - 4$ l/min, míg $0,05 - 0,35$ m³/s a „B” műszerre vonatkozóan. A kalibráló berendezés megtervezése a vonatkozó szabvány [5] előírásainak megfelelően történt, amely kimondja, hogy a kalibráló berendezés mérési hibájának egy nagyságrenddel, de legalább kétszer-háromszor kisebbnek kell lennie a kalibrálandó műszer mérési hibájánál.

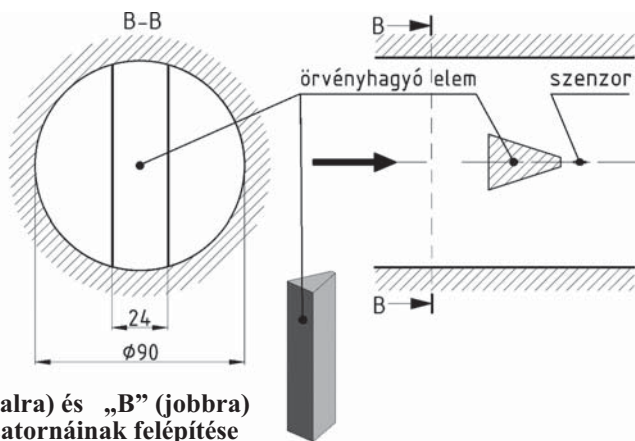
Az „A” vortex-mérőhöz tervezett kalibráló berendezés a 2. ábrán látható. A mérőfolyadék utánpótlása egy tartályból biztosított. A nyomáscsökkenésből adódó hiba elkerülése érdekében a tartály maximális megengedett vízszintcsökkenése a mérés alatt 10 mm. A közeg hőmérsékletének pontos beállítását fűtőelem végzi, a tartályból kiáramló közeg közvetlen térfogatáram-szabályozásáról pedig egy szelep gondoskodik. A frekvenciaváltóval felszerelt szivattyú a közeget a beállított térfogatárammal átáramoltatja a kalibrálandó műszerre. A műszer után közvetlenül a kalibrációs tartályba kerül a közeg, amelynek tömegét egy precíziós mérleg méri. A mérőtartályba áramló folyadéktömeg (Δm), a kifolyási idő (Δt), valamint a folyadéksűrűség (ρ_A) ismeretében számítható a térfogatáram ($Q_{A, \text{kal}}$):

$$Q_{A, \text{kal}} = \frac{\Delta m}{\Delta t \cdot \rho_A} \quad (3)$$

A „B” műszer kalibrálása a következő oldalon lévő 3. ábrán látható berendezéssel történt. A szükséges nyomáskülönbséget egy szívó üzemben működött ventilátor hozza létre, a térfogatáram szabályozása frekvenciaváltóval történik. A levegő a beszívási veszteségek minimalizálása érdekében beszívóelemen keresztül áramlik a berendezésbe. A kalibráló



2. ábra. Az „A” műszer számára tervezett kalibráló berendezés



térfogatáram ($Q_{B, kal}$) meghatározása a vortex műszer előtt elhelyezett szabványos átfolyó mérőperemmel történik (lásd bővebben: [6]), a felvezető és a műszer utáni csőszakaszok hossza a vonatkozó szabvány előírásainak megfelelően került kialakításra [6]. A mérőperemen eső nyomáskülönbség meghatározása digitális manométerrel történt. A „B” műszerrel mérhető az átfolyt térfogatáram (Q_B) és az örvényleválási frekvencia értéke. A csatlakozó csőszakaszok hosszát a műszer gyártójának előírásai szerint határoztam meg [4].

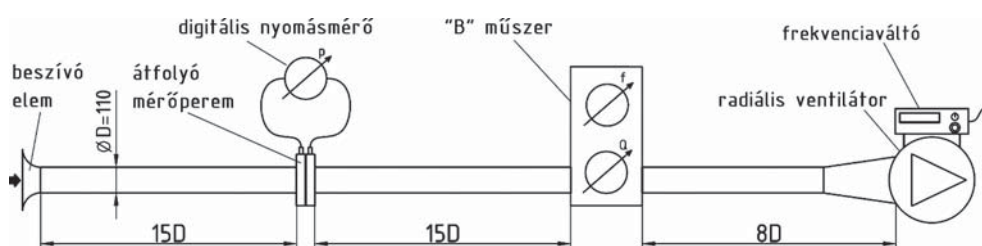
A kalibráló berendezések tervezésének utolsó lépéseként végzett előzetes hibaszámítások alapján az „A” műszerhez tartozó rendszer eredő maximális hibája 0,14%, míg a „B” műszer kalibráló berendezéséhez tartozó hiba maximális értéke 0,22%. Mivel az előzetes vizsgálatok alapján mindkét berendezés megfelel a szabványban előírt követelményeknek [5], a kalibráló berendezéseket a tervek szerint megépítettem.

Annak érdekében, hogy a kalibrációs mérések mindegyik műszerre vonatkozóan reprezentatív eredményekkel szolgálnak, szükséges, hogy a beállított üzemi állapotok az egyes áramlásmérők mérési tartományainak legalább 3/4 részét lefedjék. Figyelembe véve az „A” műszer 0,5 – 4 l/min [3], valamint a „B” műszer 0,03 – 0,35 m³/s [4] mérési tartományát, az eszközök kalibrációját elvégeztem.

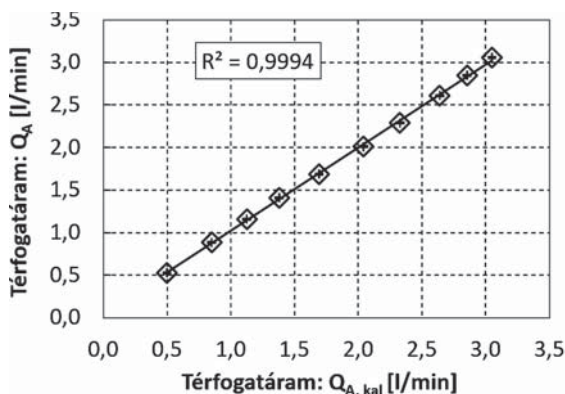
A műszerek kalibrációs diagramjai az értékekhez tartozó hibásávokkal a 4. ábrán láthatók.

Míg az „A” műszer esetén a mérési pontokra illesztett egyenes közel „1” meredekségű, tehát a műszer által mért értékek jó közelítéssel megegyeznek a kalibráló berendezéssel mértékekkel, addig a „B” műszer egyenesének meredeksége 1,16.

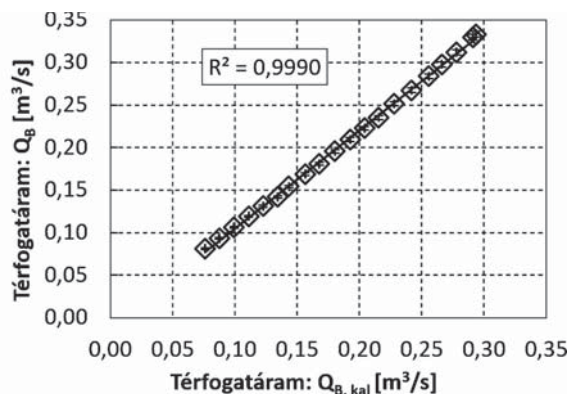
Észrevehető továbbá egy trend a pontok egyenesektől való eltérésében. Látható, hogy a legkisebb térfogatáramokon még az egyenesek fölött helyezkednek el, később lassan átkerülnek a kalibrációs egyenes alá, majd fokozatosan újra fölé tartanak. A cél ennek a nemlinearitásnak, „hullámzó” jelenségnek a behatódó vizsgálat.



3. ábra. A „B” műszer számára tervezett kalibráló berendezés



4. ábra.
Az „A” (balra)
és „B” (jobbra)
műszerek
kalibrációs
diagramjai



4. Nemlinearitási vizsgálatok

Már említettem, hogy a nemlinearitás vizsgálata lényegében a *Strouhal*-szám *Reynolds*-szám függvényében vett állandóságának vizsgálatát jelenti. A *Reynolds*-számok meghatározásához az áramlási sebességek értékei, valamint a szükséges geometriai- és anyagjellemzők is rendelkezésre állnak, viszont a *Strouhal*-számok az egyes örvényleválási frekvenciák ismerete nélkül számíthatók. Ezen értékek meghatározására egy alternatív módszert dolgoztam ki.

A módszer alapja, hogy amennyiben rendelkezésre állna a műszer egyetlen üzemi állapotát jellemző *Strouhal*-szám – *Reynolds*-szám értékpár, a kalibráció során felvett adatsorokat felhasználva az összes mérési pontra kiszámítható lenne az adott állapotbeli örvényleválási frekvencia. Az „A” műszer kiválasztott üzemi állapotát jellemző értékpárt numerikus szimuláció alkalmazásával határoztam meg (lásd részletesen: [7]), a „B” műszer esetén pedig kiválasztottam egy, a mérések kiértékelése során meghatározott *Strouhal*-számot, valamint a hozzá tartozó *Reynolds*-számot. A továbbiakban számítható az ehhez a *Reynolds*-számhoz tartozó áramlási sebesség (u_{jell}), a választott *Strouhal*-szám ismeretében pedig meghatározható a vonatkozó örvényleválási frekvencia (f_{jell}). A kiszámított áramlási sebesség, valamint az ismert keresztmetszet szorzatából számítható a pontra jellemző térfogatáram (Q_{jell}).

Ezek után meg kell határozni, hogy a jellemző térfogatáram melyik, kalibráló berendezéssel mért térfogatáram-intervalumba esik (Q_{kal}), illetve, hogy ezekhez a mért értékekhez milyen, az áramlásmérő által kijelzett (Q_m) értékek tartoznak. Lineáris interpoláció alkalmazásával kiszámítandó, hogy ha a választott jellemző ponthoz számolt térfogatáramot a kalibráló berendezéssel mértük volna, akkor ahhoz a trendet figyelembe véve milyen értéket mutatott volna a műszer ($Q_{m, jell}$). Ezt a folyamatot szemléletesen a következő oldalon látható 5. ábra mutatja.

A lineáris interpolációt elvégezve, $Q_{m, jell}$ ismeretében meghatározható egy C konstans:

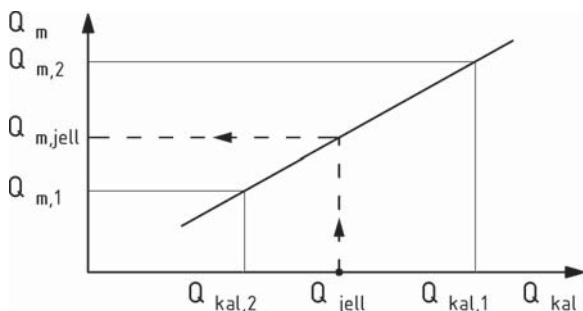
$$C = \frac{Q_{m, jell}}{f_{jell}}, \quad (4)$$

Ezek után bármely műszerről leolvasott térfogatáram értéket elosztva a fenti C tényezővel, számítható a hozzá tartozó áramyos örvényleválási frekvencia. A frekvenciák meghatározása után minden rendelkezésre áll a *Strouhal*-számok meghatározására az összes mérési pontban. A továbbiakban a bemutatott diagnosztikai eljárásra „*C*-módszer” néven fogok hivatkozni.

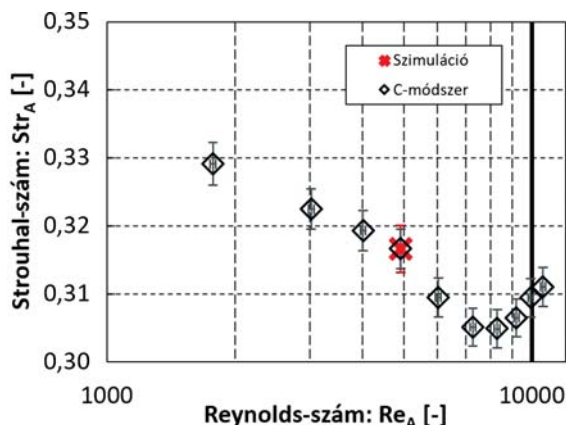
A módszer használatával előállított, az „*A*” és „*B*” műszerek viselkedését jellemző diagramok a 6. ábrán láthatók. Kijelenthető, hogy a megfogalmazott feltételezések beigazolódtak, azaz a mérési tartományon a *Strouhal*-szám lefutása nem állandó a *Reynolds*-szám függvényében. Az „*A*” műszer (bal oldal) esetén a szűk keresztmetszet áramlásra gyakorolt hatása miatt nagyobb a nemlinearitás hatása. A kapott eredmények, valamint a tanulmányban bemutatott diagnosztikai eljárás validálása a „*B*” műszer (jobb oldal) adatsorainak összehasonlításával végezhető el. Mivel a mérésből kapott, valamint a *C*-módszerrel előállított pontok közti eltérések mindenhol hibaszávon belül vannak, illetve az adatsorok korrelációs együtthatója 0,973, ezért a módszer megbízhatónak tekinthető.

5. Összegzés

A cikkben bemutattam két különböző vortex áramlásmérő teljes kalibrálási folyamatát, valamint nemlineáris viselkedésük vizsgálatát. Ez magában foglalta kalibráló berendezések tervezését és kivitelezését, a kalibrálási mérések elvégzését, majd a mérési adatok feldolgozását és azok kiértékelését. Figyelembe véve az egyes kereskedelmi forgalomban kapható vortex-mérők által nyújtott limitált mérési lehetőségeket, olyan diagnosztikai módszert dolgoztam ki, amellyel a nemlinearitás hatása olyan eszközökre vonatkozóan is feltárható, amelyek esetében az örvényleválási frekvencia direkt módon történő mérése nem megoldott.



5. ábra. A módszer során elvégzett lineáris interpoláció



6. ábra. Az „*A*” (balra) és „*B*” (jobbra) műszerek *Strouhal*-szám változása a *Reynolds*-szám függvényében

A vizsgálatok eredményeként mindkét műszere vonatkozóan meghatároztam a *Strouhal*-szám *Reynolds*-szám függését. Jelen tanulmány eredményeinek felhasználásával a vortex-áramlásmérők hibája aktív, illetve passzív módokon csökkenthető. Az aktív módszer magában foglalja az örvényhagyó elem- és a mérőcsatorna geometriájának továbbfejlesztését, továbbá a megszerzett tapasztalatok alapján – az áramlásmérő szoftverének módosításával – a pontosság passzív módon is növelhető.

6. Köszönetnyilvánítás

A cikk elkészítését támogatta a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal a K 112277 pályázat keretein belül.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben”, valamint a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” című projektek szakmai célkitűzéseinek megvalósításához.

A projektek megvalósítását a TÁMOP-4.2.2.B-10/1-2010-0009 és a TÁMOP-4.2.1/B-09/11/KMR-2010-0002 programok támogatják.

7. Irodalomjegyzék

- [1] Yoder, J., "Versatile flowmeter to see growth due to industry approvals". *Flow Control*, vol. 16(12), pp. 48–49, 2010.
- [2] Endress, U., Hafner, P., Jäggi, A., Kempf, G., Lang, M., Meyer, P., Schinke, A., Schulz, K., Sickinger, J., Silbermann, R., Steiner, K., Thommen, H., Tschabold, P., Wetzler, P., Zeller, E., "Vortex-Durchflusssmessgeräte", *Durchfluss Fibel. 3. Ausgabe*, pp. 53-71, 1990. (ISBN: 3905615037)
- [3] SMC Co., "3-color display digital flow switch for water-series PF3W", 2012. (www.smcworld.com)
- [4] Kobold Messring GmbH, "Operating Instructions for Vortex Flow Measuring System – Model: PWL", verziószám: 05/04. (www.kobold.com)
- [5] ISO/IEC, "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories", *ISO/IEC 17025:2005(E)*. Second edition, pp. 1-28, 2005. (www.iso.org)
- [6] ISO/IEC, "Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements", *ISO 5167-1:2003 (E)*. Second edition, pp. 1-33, 2003. (www.iso.org)
- [7] Fenyvesi, B., "Vortex áramlásmérő nemlineáris viselkedésének vizsgálata numerikus szimuláció alkalmazásával", *XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT 2017*, pp. 139–142, 2017.

